

Thema: Untersuchungen an Röntgenspektren

1 Versuch 1:

Es werden Röntgenspektren über einen großen Winkelbereich bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen aufgenommen. Die Messgraphen liegen Ihnen in den Abbildungen 1-1, 1-2 und 1-3 vor.

Die Formel $2 \cdot d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$ für die Bragg-Reflexion dürfen Sie im Folgenden ohne Herleitung benutzen.

Der benutzte NaCl-Kristall hat den Gitterebenenabstand $d = 2,8197 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

- 1.1 Erläutern Sie, wie die Röntgenstrahlung des benutzten Gerätes erzeugt wird und begründen Sie, warum Röntgenlicht in der Regel aus Licht unterschiedlicher Wellenlängen besteht.

Die aus einer Glühkathode austretenden Elektronen werden durch eine angelegte Hochspannung beschleunigt. Sie treffen dann auf die Anode und werden dort abgebremst. Die frei werdende Energie wird als Strahlung ausgesendet. Durch eine Anode, deren ebene Begrenzungsfläche im Winkel 45° zur Bahn der einfallenden Elektronen steht, werden die Photonen der Strahlung quasi reflektiert, d. h. im Winkel von 90° zur Elektronenrichtung ausgesendet. Da die Elektronen beim Auftreffen auf die Anode unterschiedlich stark abgebremst werden, werden unterschiedliche Energiemengen frei und damit auch Photonen unterschiedlicher Energie bzw. Wellenlänge.

- 1.2 Das Spektrum einer Lichtquelle lässt sich unter anderem mit Hilfe eines Prismas, eines Gitters oder der Bragg-Reflexion erzeugen. Erläutern Sie kurz, wie die Trennung in Licht verschiedener Wellenlängen mit Hilfe dieser Methoden zu Stande kommt.

Prisma: verschiedenfarbiges Licht (also Licht unterschiedlicher Wellenlänge) breitet sich in einem Prisma mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Dabei ist blaues Licht langsamer als rotes Licht. Bei schrägem Auftreffen wird deshalb blaues Licht stärker abgelenkt als rotes Licht.

Gitter: Huygenssche Elementarwellen, die in den Gitteröffnungen entstehen, interferieren hinter dem Gitter an den Stellen konstruktiv, an denen der Gangunterschied ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt. Da verschiedenfarbiges Licht unterschiedliche Wellenlängen hat, wird es entsprechend der Wellenlänge unterschiedlich weit abgelenkt. Da die Wellenlänge roten Lichts größer ist als die von blauem Licht, wird rotes Licht stärker abgelenkt.

Bragg-Reflexion: Im Gegensatz zum Gitter, bei dem in den Gitterspalten Huygenssche Elementarwellen entstehen, entstehen diese bei der Bragg-Reflexion an räumlichen Gitterpunkten.

- 1.3 Benennen Sie in Abbildung 1-1 (Winkel angeben!) die einzelnen Bestandteile des Spektrums und erläutern Sie die Ursachen für die Erzeugung dieser Bestandteile.

Ab etwa 3° nach rechts: Bremsspektrum, erzeugt durch das Abbremsen der Elektronen im Anodenmaterial.

Erstes Nebenmaximum bei etwa $6,5^\circ$ und $7,3^\circ$: Zwei Linien des charakteristischen Spektrums, erzeugt durch Anregung der Atome im Anodenmaterial. Bei Energieabgabe der angeregten Atome wird jeweils Licht einer genau festgelegten Frequenz emittiert.

Bei etwa $13,0^\circ$ und $14,6^\circ$ Linien des 2. Nebenmaximums und bei etwa $19,6^\circ$ und $22,2^\circ$ Linien des 3. Nebenmaximums bei der Bragg-Reflexion.

- 1.4 Vergleichen Sie die Spektren 1-1, 1-2 und 1-3.

Geben Sie Gründe für Übereinstimmungen und Unterschiede an.

Die Beschleunigungsenergie nimmt vom Spektrum 1-1 über das Spektrum 1-2 zum Spektrum 1-3 ab.

Die Maximalenergie $E = h \cdot f$ der Photonen hängt von der jeweiligen Beschleunigungsspannung ab. Bei sinkender Beschleunigungsspannung werden die Energie kleiner und damit die Wellenlänge λ und der Auffangwinkel α größer. Zu jeder Beschleunigungsspannung gehört deshalb eine kleinste Grenzwellenlänge der Photonen mit der größten Energie.

Das charakteristische Spektrum ist immer an derselben Stelle zu finden, da die Anregungsenergie des Anodenmaterials unabhängig von der Beschleunigungsspannung ist.

Geringe Beschleunigungsspannungen ergeben niedrige Intensitäten.

Bei konstanter Beschleunigungsspannung werden mehr Photonen mit hoher als mit niedriger Energie erzeugt (Abfall der Messkurven zu großen Winkeln hin).

1.5 Berechnen Sie die Beschleunigungsspannung, mit der das Spektrum 1-1 aufgenommen wurde.

Die Beschleunigungsenergie der Elektronen und damit die Maximalenergie der Photonen beträgt

$$W_e = e \cdot U_B = W_{max} = h \cdot f. \text{ Mit Hilfe der Formel } c = f \cdot \lambda \text{ folgt } f = \frac{c}{\lambda} \text{ und damit } W_{max} = h \cdot \frac{c}{\lambda}.$$

Aus der Bragg-Formel $2 \cdot d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$ folgt $\lambda = \frac{2 \cdot d \cdot \sin \alpha}{n}$ und damit

$$W_{max} = e \cdot U_B = \frac{h \cdot c \cdot n}{2 \cdot d \cdot \sin \alpha} \rightarrow U_B = \frac{h \cdot c \cdot n}{e \cdot 2 \cdot d \cdot \sin \alpha}.$$

Wie in 1.3 angegeben, beginnt das Spektrum beim Winkel 3° .

Mit $n=1$, $d=2,8197 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, $\alpha=3^\circ$, $h=6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $e=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ und $c=2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

folgt $U_B = 42000 \text{ V}$.

2 Versuch 2:

Drei Röntgenspektren werden aufgezeichnet. Im Gegensatz zum Versuch 1 wird jeweils nur der Bereich von 2° bis 12° betrachtet und die Beschleunigungsspannung ist hier in allen 3 Teilversuchen gleich:

- Messung aus Versuch 1, ohne Absorptionsfolie (Abb. 2-1 ist Teilbild aus Abb. 1-1).
- Vor Auftreffen auf den Kristall durchsetzt das Röntgenlicht eine Kupferfolie (Abb. 2-2).
- Vor Auftreffen auf den Kristall durchsetzt das Röntgenlicht eine Zirkonfolie (Abb. 2-3).

2.1 Vergleichen Sie die Messgraphen aus a) und b). Untersuchen Sie durch Auswerten der Spektren an genügend vielen Stellen das Absorptionsvermögen (in Prozent) von Kupfer in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Ansatz: Die Kurve für die Kupferfolie darf nicht für sich allein betrachtet werden, sondern muss in Verbindung mit der Ausgangskurve untersucht werden.

qualitativ: Die Messkurven sind sehr ähnlich. Die Winkel für besondere Stellen (Peaks) sind bei beiden Messungen gleich. Die Intensität ist bei Messung mit der Kupferfolie überall geringer als ohne Folie.

quantitativ: In $0,5^\circ$ -Schritten werden die Intensitäten bestimmt und die Absorption wird in Prozent berechnet (siehe Tabelle im Anschluss an die Messgraphen).

Auswertung: Das Absorptionsvermögen von Kupfer steigt zu niedrigen Energien hin an. Daraus kann man folgern, dass Kupfer für Röntgenlicht hoher Energien durchsichtiger ist als für Röntgenlicht niedriger Energie.

2.2 Vergleichen Sie die Messgraphen aus b) und c). Gehen Sie bei diesem Vergleich auf die unterschiedliche Absorptionsfähigkeit (in Prozent) von Kupfer und Zirkon bei unterschiedlichen Wellenlängen ein.

qualitativ: Zu unterscheiden sind die Bereiche für $\alpha < 7^\circ$ und $\alpha > 7^\circ$.

quantitativ: In $0,5^\circ$ -Schritten werden die Intensitäten bestimmt und die Absorption wird in Prozent berechnet (siehe Tabelle im Anschluss an die Messgraphen).

Auswertung: Bis etwa $6,5^\circ$ stimmt das Absorptionsverhalten für beide Folien etwa überein. Bei Winkeln größer als $6,5^\circ$ lässt Zirkon Röntgenlicht wesentlich besser durch als Kupfer. Für größere Winkel nähert sich die Absorptionseigenschaft für beide Folien wieder an.

2.3 Information: Strahlt Zirkon Licht aus, so hat dabei der energiereichste Bestandteil die Wellenlänge $70,1 \text{ pm}$. Erklären Sie mit Hilfe dieser Information das Spektrum unter c), berechnen Sie den Bragg-Winkel, bei dem der deutliche Unterschied in den Spektren b) und c) beginnen muss und vergleichen Sie mit dem Messgraph.

Einfluss von Zirkon:

Im Bereich von etwa 7° absorbiert Zirkon vermehrt dadurch Röntgenlicht, dass die Zirkon-Atome angeregt werden. Beim Abgeben dieser gespeicherten Energie wird das Licht in alle Richtungen ausgesendet, fehlt also zum größten Teil in der Bilanz, weil nur in Vorwärtsrichtung gemessen wird.

Je näher die Photonenenergie an der Anregungsenergie liegt, desto besser kann die Anregung und damit die Absorption erfolgen. Die Intensität ist also verringert.

Erklärung des Spektrums:

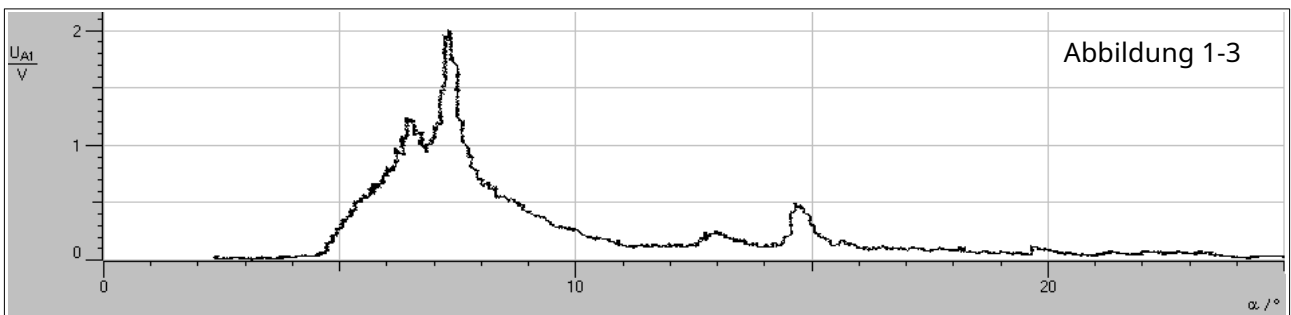
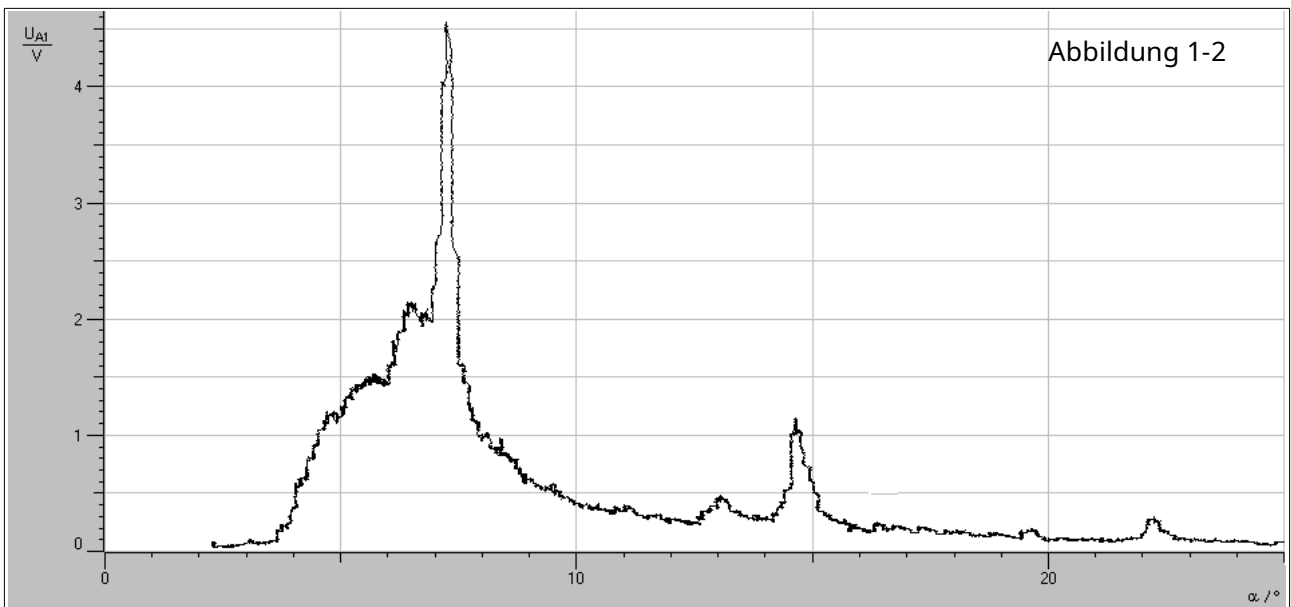
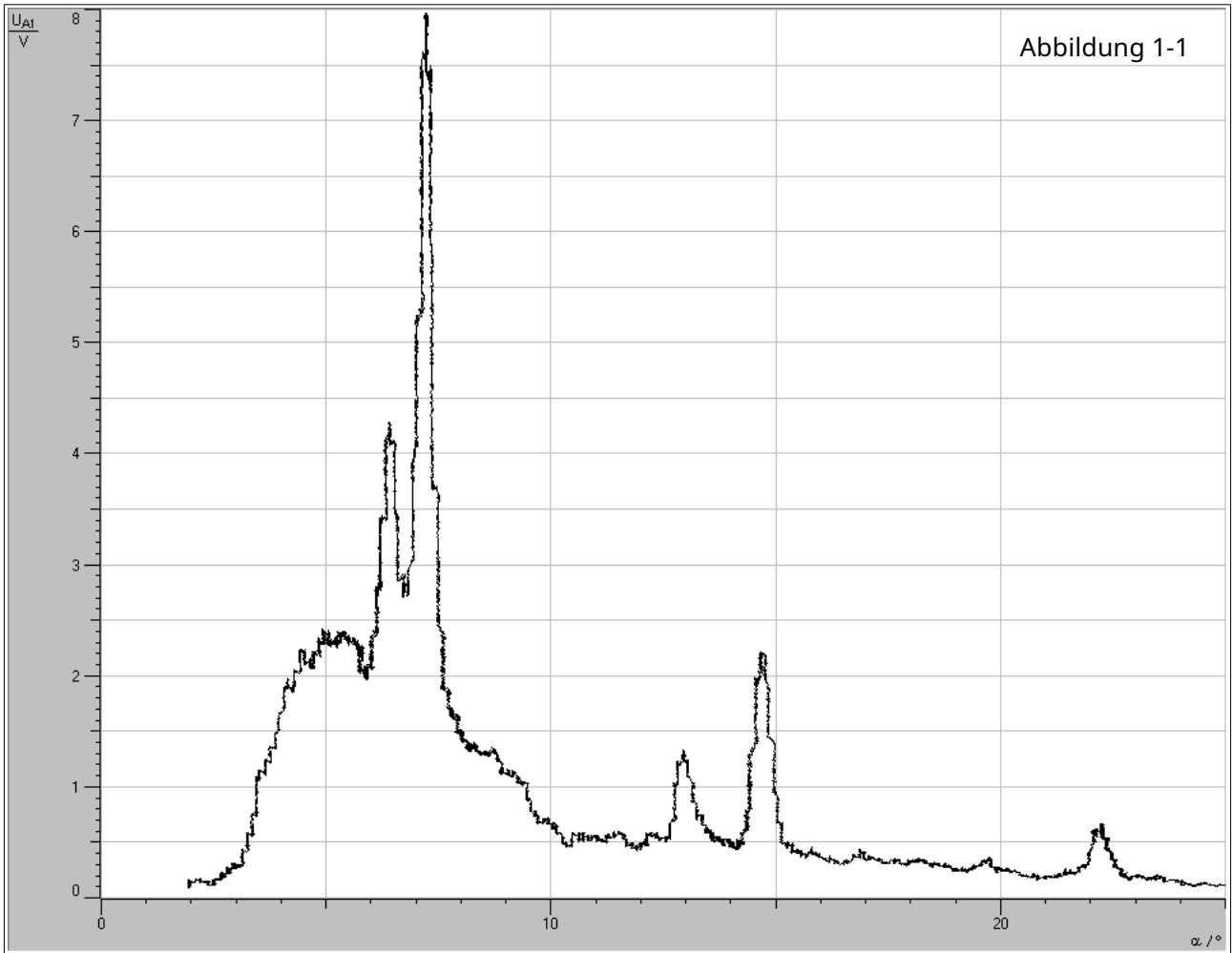
Beim Winkel, der zur Zirkonlinie gehört, ist die Absorption maximal. Bei kleineren und größeren Winkeln ähnelt das Spektrum dem Spektrum ohne Absorptionsfolie.

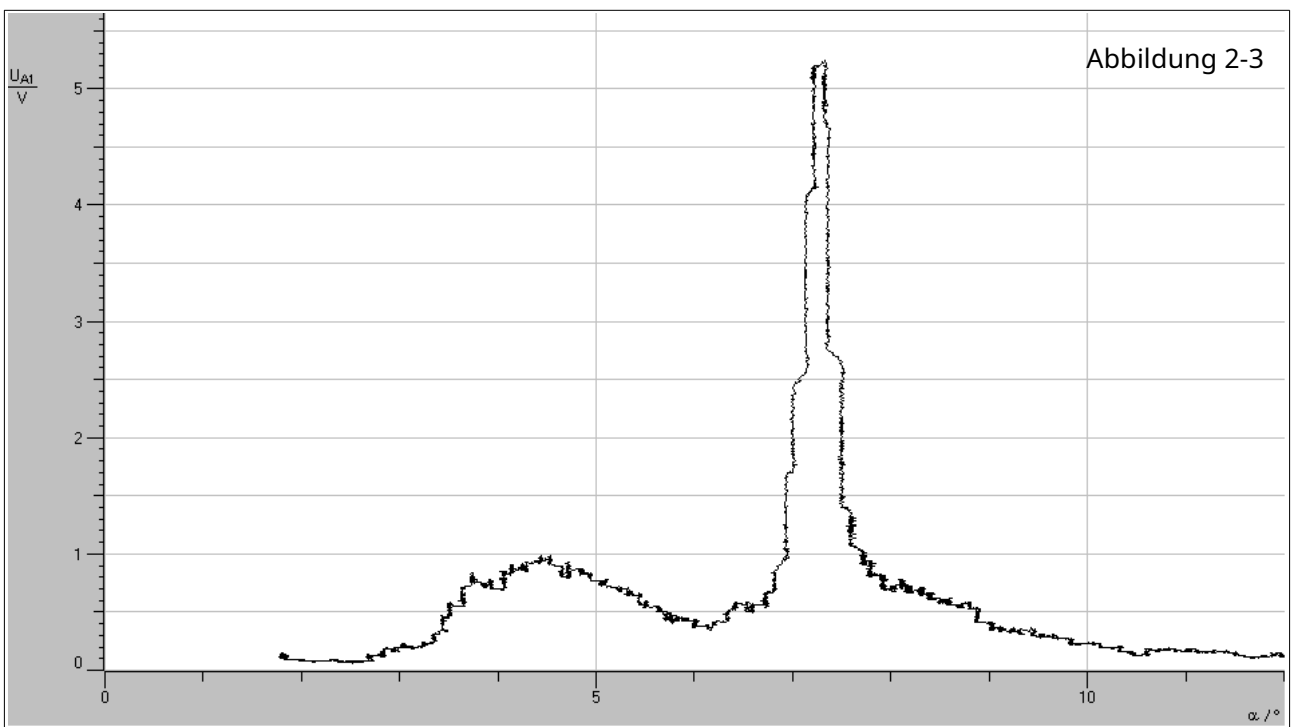
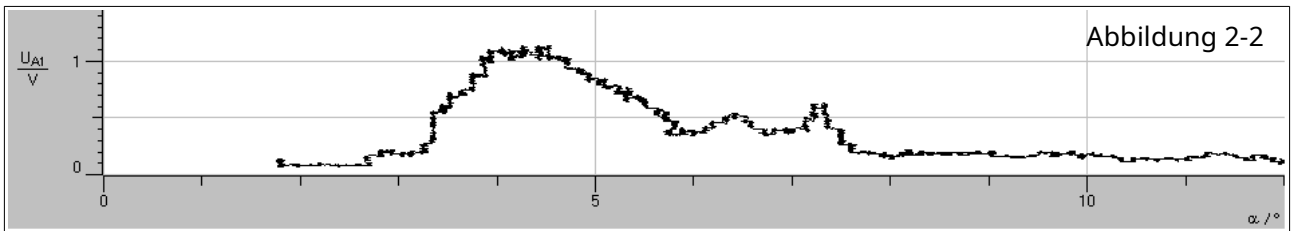
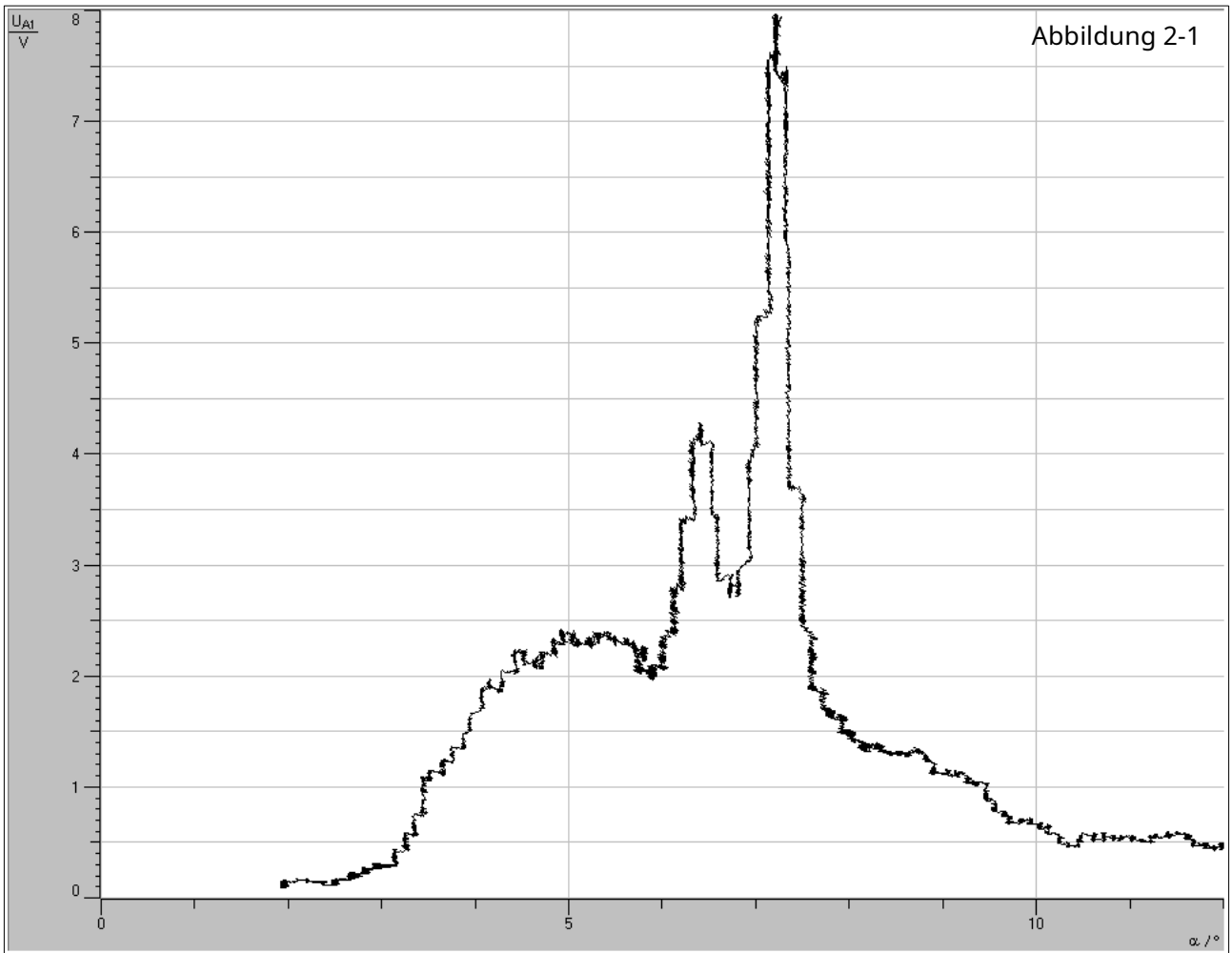
Berechnung des Bragg-Winkels für $\lambda = 70,1 \text{ pm}$:

Aus $2 \cdot d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$ folgt mit $n=1$

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{2 \cdot d} = \frac{70,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}}{2 \cdot 2,8197 \cdot 10^{-10} \text{ m}} = 0,1259 \rightarrow \alpha = \arcsin(0,1259) = 7,2^\circ$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem Maximum in Abbildung 2-3 überein.





Auswertung der Spektren mit und ohne Absorptionsfolien

Winkel	ohne	Kupfer	Zirkon	ohne-Kupfer	ohne-Zirkon	o-K in %	o-Z in %
2,0	0,15	0,10	0,10	0,05	0,05	33,33	33,33
2,5	0,15	0,10	0,10	0,05	0,05	33,33	33,33
3,0	0,25	0,20	0,20	0,05	0,05	20,00	20,00
3,5	1,05	0,70	0,50	0,35	0,55	33,33	52,38
4,0	1,70	1,10	0,80	0,60	0,90	35,29	52,94
4,5	2,15	1,00	0,95	1,15	1,20	53,49	55,81
5,0	2,35	0,80	0,75	1,55	1,60	65,96	68,09
5,5	2,35	0,60	0,55	1,75	1,80	74,47	76,60
6,0	2,15	0,40	0,40	1,75	1,75	81,40	81,40
6,5	6,20	0,50	0,50	5,70	5,70	91,94	91,94
7,0	4,90	0,40	2,20	4,50	2,70	91,84	55,10
7,5	2,40	0,25	2,20	2,15	0,20	89,58	8,33
8,0	1,40	0,15	0,70	1,25	0,70	89,29	50,00
8,5	1,30	0,15	0,55	1,15	0,75	88,46	57,69
9,0	1,10	0,15	0,40	0,95	0,70	86,36	63,64
9,5	0,80	0,15	0,30	0,65	0,50	81,25	62,50
10,0	0,60	0,15	0,25	0,45	0,35	75,00	58,33
10,5	0,50	0,10	0,15	0,40	0,35	80,00	70,00
11,0	0,50	0,10	0,15	0,40	0,35	80,00	70,00
11,5	0,50	0,10	0,15	0,40	0,35	80,00	70,00

